

航空發動機葉片 機械加工工藝

郭文有 編著

國防工業出版社

V263.1
1004-2

航空发动机叶片 机械加工工艺

郭文有 编著



lw
CA少图
三张图纸
幻灯片演示

一九九五年四月六日



30739107

5

国防工业出版社

739107

(京)新登字106号

内 容 简 介

本书共分十一章,对航空发动机叶片机械加工工艺作了全面介绍,主要内容有:叶片制造工艺概述,叶片机械加工工艺过程实例,叶片机械加工基准转换及尺寸链计算,叶片进排气边、叶型、榫头、缘板、阻尼台、叶尖、槽、孔的加工等。针对叶片有些尺寸计算比较复杂的特点,在某些章节对有关尺寸的计算作了介绍。此外,对叶片常用材料的机械加工工艺也作了简介。

本书可供从事叶片制造的工程技术人员参考,也可作为高等院校和中等专业学校学生学习机械制造工艺技术的参考书。

航空发动机叶片机械加工工艺

郭文有 编著

责任编辑 邢海鹰

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23号)

(邮政编码 100044)

陕西广播电视印刷厂印装

787×1092 1/16 印张15 350千字

1994年7月第一版 1994年7月第一次印刷 印数:00 001-1500册

ISBN 7-118-01248-3/TH

定价:20.00 元

前 言

本书是依据我国现有航空发动机叶片机械加工工艺技术，参考一些国内外资料，在总结叶片机械加工实践经验基础上写成的。希望能为初从事叶片机械加工的技术人员提供帮助，使他们更快地熟悉叶片机械加工工艺技术。以此为我国航空事业的发展作一点贡献。

叶片机械加工过程长而复杂，涉及到的加工方法繁多。从纵的方面看，各类叶片加工工艺各有特点；从横的方面看，不同类型的叶片的加工又有很多相同之处。编著《航空发动机叶片机械加工工艺》，如何做到既系统全面、又不重复罗列，既能贯通叶片机械加工全过程，又能归纳出普遍规律，本人对此确实感到难度很大。反复研究，最后形成了本书纵横兼顾的叙述方法：纵的方面，对叶片加工工艺全过程进行介绍；横的方面，按叶片部位介绍加工工艺。第二章、第三章分别介绍了叶片机械加工的工艺过程和加工基准的建立及转换规律。第四章到第九章分别对叶片进排气边、叶型、榫头、缘板、阻尼台等部位的加工方法、检测方法及复杂的计算作了介绍。第一章、第十章和第十一章，是有关叶片加工工艺技术的综合介绍。希望读者读后能收到既能系统地从全局上掌握叶片机械加工工艺过程、又能掌握叶片具体部位的加工和检测方法的效果，在编制具体叶片的加工规范、进行工艺尺寸计算、处理具体技术问题时作为借鉴，这也就达到了编著此书的目的。

本书得到中国航空学会副理事长傅恒志教授的关心和帮助，书稿是由陆培庆、顿启斌校对，经周国锋、杨业才、李孟珍审定的，在此深表感谢。

本书编写过程中得到兄弟单位有关人员的支持和帮助，查阅了西安航空发动机公司陆培庆、孙明仁、白新城、金小波、李文广等人的技术总结，吸收了他们的经验，在此一并表示感谢。

由于水平有限，加之不能全面了解兄弟单位的技术水平等原因，缺点、错误在所难免，肯切希望读者给予批评指正。

编著者

1994. 元月

目 录

第一章 概 述

1.1 航空发动机与叶片制造工艺-----	(1)
1.2 叶片的结构和有关叶片的名称术语-----	(1)
1.3 航空发动机叶片的制造-----	(9)
1.4 叶片制造工艺的现状和发展趋势-----	(10)
1.5 叶片加工工艺规程编制的程序-----	(12)
1.6 符号及含义-----	(12)

第二章 叶片加工工艺过程

2.1 压气机转子叶片加工工艺过程-----	(14)
2.2 压气机整流叶片加工工艺过程-----	(22)
2.3 涡轮转子叶片加工工艺过程-----	(28)
2.4 涡轮导向器叶片加工工艺过程-----	(35)

第三章 叶片加工基准及尺寸链计算

3.1 叶片设计基准与加工基准-----	(40)
3.2 叶片精密定位-----	(47)
3.3 叶片加工尺寸链及角度链的计算-----	(52)

第四章 叶片进气边和排气边的加工

4.1 叶片进、排气边的粗加工-----	(57)
4.2 叶片进、排气边形状的加工-----	(62)
4.3 叶片进、排气边的测量-----	(63)
4.4 有关叶片进、排气边的计算-----	(68)

第五章 叶片型面加工

5.1 电解加工叶身型面-----	(71)
5.2 电脉冲加工叶身型面-----	(83)
5.3 叶型的仿型加工-----	(85)
5.4 叶型的成型机械加工-----	(96)
5.5 线切割加工叶型-----	(98)
5.6 叶型抛光加工-----	(98)

5.7	叶身型面的校正	(100)
5.8	叶片型面测量	(101)
5.9	有关叶型的计算	(114)

第六章 叶片榫头加工

6.1	榫头结构及加工方法	(121)
6.2	拉削加工叶片榫头	(123)
6.3	铣削加工叶片榫头	(131)
6.4	成型磨削叶片榫头	(133)
6.5	叶片圆弧型榫头的加工方法	(141)
6.6	叶片榫头测量和计算	(156)

第七章 叶片缘板加工

7.1	缘板结构和加工方法	(162)
7.2	缘板侧面和缘板端面的加工方法	(166)
7.3	缘板外侧面的加工方法	(172)
7.4	缘板内侧面的加工方法	(175)
7.5	叶片缘板的测量和计算	(177)

第八章 阻尼台加工和叶尖加工

8.1	阻尼台加工和测量	(191)
8.2	叶尖的加工和测量	(203)

第九章 叶片小槽小孔的加工

9.1	叶片的小槽和小孔	(208)
9.2	叶片小孔加工对机床的要求	(210)
9.3	激光加工叶片小孔	(210)
9.4	电子束加工叶片小孔	(212)
9.5	电脉冲加工小孔小槽	(213)
9.6	电解加工小孔	(214)

第十章 叶片的强化与光饰

10.1	叶片喷丸强化处理	(215)
10.2	叶片的吹砂处理	(218)
10.3	叶片的光饰处理	(219)

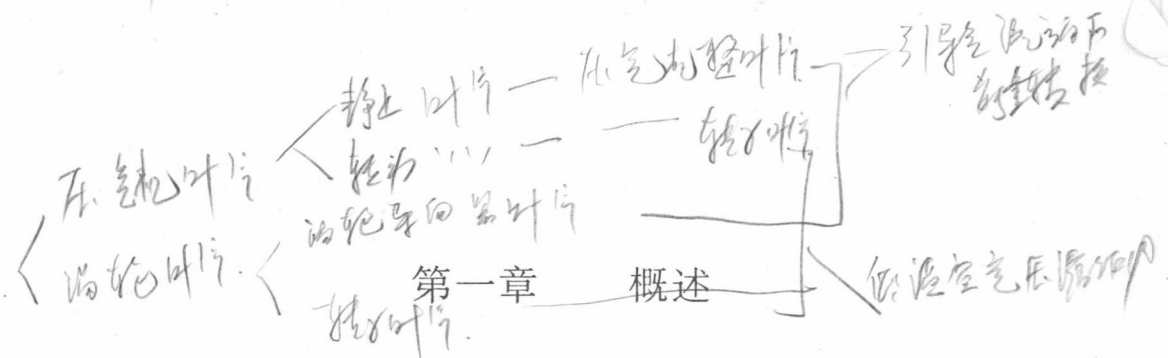
第十一章 叶片常用材料机械加工工艺简介

11.1	铝合金机械加工工艺	(222)
11.2	钛合金机械加工工艺	(223)

11.3 叶片用不锈钢机械加工工艺----- (225)

11.4 高温合金机械加工工艺----- (226)

参考文献----- (228)



1.1 航空发动机与叶片制造工艺

叶片是航空发动机零件中非常重要的一类零件，对发动机的性能起着关键作用。发动机性能主要体现在推力、燃油效率、使用寿命等方面。这些指标的高低，都直接受叶片的设计水平和制造质量的影响，而且是主要的影响。要提高发动机的推力和燃油效率，就要增加压气机的增压比，就要提高涡轮的工作温度和能量转换率等。这些措施的实现，主要靠叶片性能的提高。在发动机零件中，叶片是寿命较短的零件，提高叶片的质量可直接延长发动机寿命。人们常称航空发动机“一肚子叶片”，特别是对轴流式发动机，这种说法确实不过分。就轴流式发动机而言，叶片制造工作量占整机制造工作量的三分之一左右。

正是由于航空叶片的加工制造对航空发动机十分重要，加之叶片形状不规则，尺寸计算复杂，与普通零件有很大差异，因此叶片制造工艺成为发动机制造工艺中一个专业化很强的分支。航空发动机叶片制造技术与民用叶片制造技术，比如汽轮机叶片、烟机叶片、轴流式风机叶片的制造技术，既有差异，也有共同性，相互结合和补充，在机械制造工艺中，共同形成和发展成为占有相当比重的叶片制造专业。研究叶片制造工艺，发展叶片制造技术，无疑对我国的航空工业，乃至机械制造工业的许多部门都有着重要意义。

航空发动机叶片的分类有两种分法。按叶片在发动机上安装的部位分：安装在压气机部分的叶片统称为压气机叶片，其中静止的叶片叫做压气机整流叶片（压气机静子叶片），转动的叶片叫压气机转子叶片（压气机动叶片）；安装在涡轮部分的叶片统称涡轮叶片，其中静止的叶片叫涡轮导向器叶片（涡轮静子叶片），转动的叶片叫涡轮转子叶片（涡轮动叶片）。按叶片是否转动分：压气机整流叶片和涡轮导向器叶片，都是静止的，统称静子叶片，起引导气流方向和能量转换的作用。压气机转子叶片与涡轮转子叶片都是转动的，统称转子叶片。压气机转子叶片被转子带动对低温空气起压缩作用；涡轮转子叶片从高速、高压、高温燃气获得能量，带动涡轮转子转动。各种叶片的工作环境不同，决定了其结构、用料以及制造工艺的不同。图1-1示出了轴流式发动机各种叶片的装配位置。

1.2 叶片的结构和有关叶片的名称术语

叶片的结构分为两部分，即型面部分（又称叶型部分或叶身）和基体部分（包括榫头、缘板、叶冠等），榫头是基体的主要部分，叶片主要名称和术语见图1-2。

叶型——叶片上具有气动外型部分的剖面，又称叶型截面或叶型剖面，剖面方向与叶片设计坐系的Z轴垂直。

理想（理论）叶型——由叶型参数及坐标点的理论位置确定的叶型。

叶身——叶片上所有具有叶型（包括非完整叶型及各过渡段）的部分。

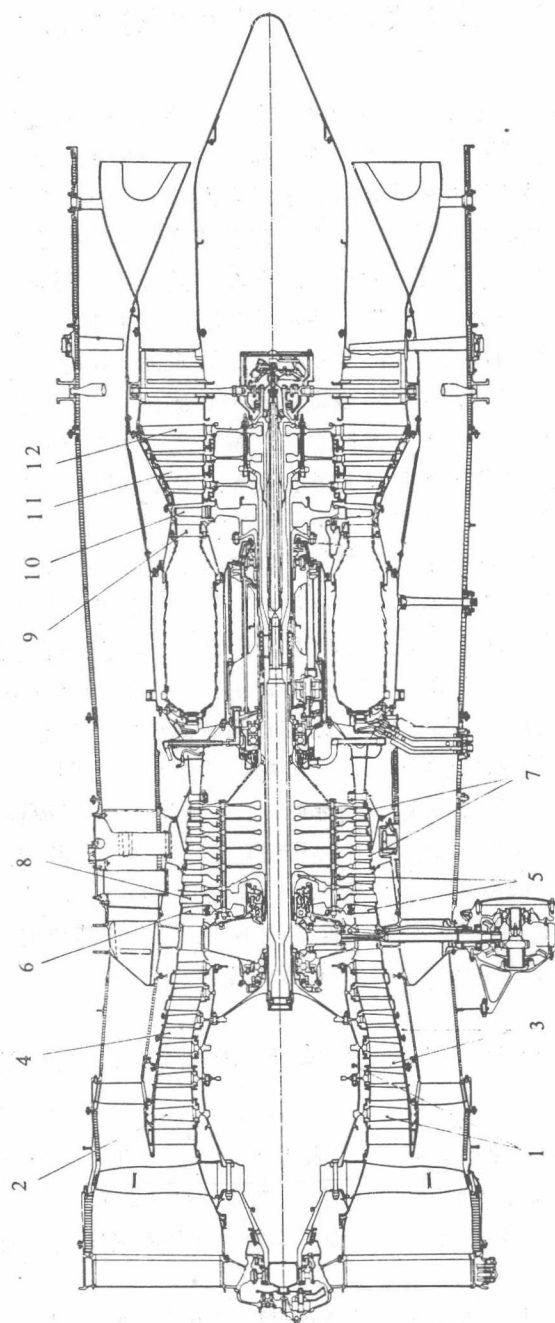


图1-1 轴流航空发动机

- 1-低压压气机转子；2-低压压气机转子叶片；3-低压压气机静子；4-低压压气机静子叶片；5-高压压气机转子；
6-高压压气机转子叶片；7-高压压气机静子；8-高压压气机静子叶片；9-高压涡轮导向器叶片；10-高压涡轮转子叶片；
11-低压涡轮导向器叶片；12-低压涡轮转子叶片。

基体——叶片上除叶身部分之外的部分的统称。

叶背——叶身凸起的一面。

叶盆——叶身凹下的一面。

型线——构成叶型叶背轮廓的轮廓线叫叶背型线；构成叶型叶盆轮廓的轮廓线叫叶盆型线。叶背型线与叶盆型线统称型线。

进气边、进气边圆弧——叶身迎着气流的边缘部分叫进气边，也叫叶片前缘；进气边连接叶盆、叶背型线的圆弧叫进气边圆弧，也称前缘圆弧。

排气边、排气边圆弧——叶身背着气流的边缘部分叫排气边，也叫叶片后缘；排气边连接叶盆、叶背型线的圆弧叫排气边圆弧，也称后缘圆弧。

进气边圆弧半径——进气边圆弧的半径，也叫前缘半径，用 R_q 表示。

排气边圆弧半径——排气边圆弧的半径，也叫后缘半径，用 R_h 表示。

前缘切点、后缘切点——前、后缘圆弧分别与叶盆、叶背型线的切点。

③ 弦线——叶型截面上，与叶盆的前、后部型线同时相切的切线。

弦(线)长——叶型在弦线上投影的长度。

弦线角——弦线在 XOY 平面上的投影与发动机轴中心线的夹角。

叶片扭角、叶身平均弦、平均弦线角——叶身各截面(不包括非完整叶型)中，具有最大最小弦线角的两截面弦线的夹角称作叶片扭角，其平分线叫叶身平均弦，它与发动机轴线的夹角叫平均弦线角。

扭转角——指叶型实际弦线偏离理论位置的角度；一个叶型弦线与另外一个叶型弦线的夹角角度值叫做这两个叶型截面的相对扭转角。

积叠轴线——设计确定的用来确定叶型位置的一条直线，与叶片设计坐标系的 Z 轴平行或重合。

积叠点——叶型剖面与积叠轴的交点。

规定剖面——设计图中给定的各叶型截面 I-I、II-II 等。

中弧线——叶型各处厚度中点的连线。

榫头——叶片在发动机上安装定位的部分。

上述各条术语，分别参见图1-2~图1-5。

有关叶片的名称和术语目前并没有统一标准，同一个概念有不同的说法。本书尽量参考有关标准确定名称和术语。除上面已定义的几条外，本章各图还示出了一些名称的概念，可按图示领会，不再定义。

1.2.1 叶片型面部分

型面部分是叶片的主要部分，决定着叶片气动性能的好坏，是叶片设计和制造的重要部位，叶片型面的几何形状是复杂的空间型面，绝大多数的航空发动机叶片是用给出坐标点的方法确定叶片型面形状的。

坐标系的建立如图1-3所示。

XOY 平面是过发动机轴中心线的水平面。

Z 轴垂直发动机轴中心线，但不一定与其相交，以发动机半径增大方向为正。

X轴一般平行于平均弦线，由前向后的方向为正。

Y轴按 $\vec{X} \times \vec{Y}$ （右手法则）确定方向。

大多数叶片在设计时取Z轴与积叠轴重合。

在叶片设计和加工中，坐标系中三个坐标轴的方向常被用作确定叶片某个部位位置或方向的参照方向，分别称作X向、Y向、Z向，例如叶型Y向偏移，X方向尺寸链等等。

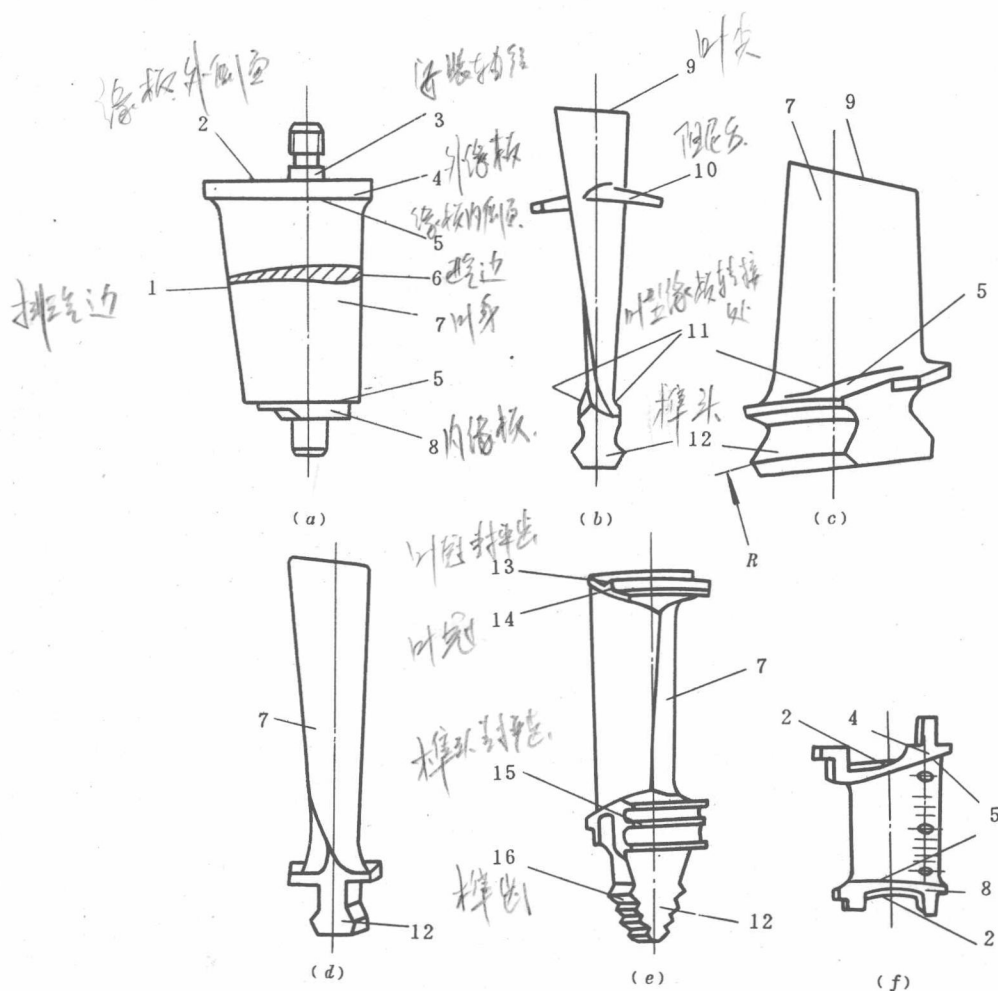


图1-2 叶片主要部位名称

(a) 压气机整流叶片；(b) 阻尼台叶片；(c) 圆弧燕尾榫头叶片；

(d) 风扇叶片；(e) 涡轮转子叶片；(f) 涡轮导向器叶片。

1—排气边；2—缘板外侧而；3—安装轴径；4—外缘板；5—缘板内侧而；6—进气边；

7—叶身；8—内缘板；9—叶尖；10—阻尼台；11—叶型缘板转接处；12—榫头；

13—叶冠封严齿；14—叶冠；15—榫头封严齿；16—榫齿。

如图1-4所示, 设计时按 Z 向一定距离给定剖面 I-I、II-II等, 有时为了制造锻模的需要, 在有效长度之外还要给出一两个剖面, 设计时只给出这些剖面的几何形状, 剖面与剖面之间的部分, 制造时靠圆滑过渡来确定。

各剖面的几何形状, 是通过分别给出其在 XOY 平面内的投影给出其形状的, 主要由四个部分构成: 叶盆型线, 叶背型线, 进、排气边圆弧(或曲线)。叶盆、叶背型线部分, 给出一些离散的坐标点 (X_i, Y_i) , 点和点之间圆滑连接成型线。进、排气边部分, 有两种形式: 圆弧形和非圆弧形。圆弧形, 是给出圆弧半径 R_g 、 R_h 和圆心, 使圆弧与叶盆叶背型线相切, 有时还要给出切点; 非圆弧进排气边, 如椭圆形进气边, 设计图给出的方法与圆弧形基本相同, 即既要给出其形状, 又要给出其位置。

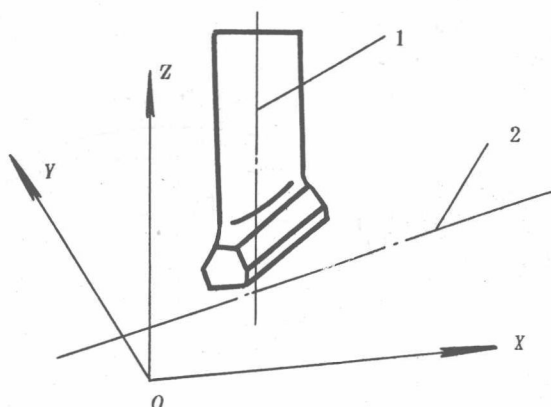


图1-3 XYZ 坐标系
1—积叠轴; 2—发动机轴线。

叶片叶型的类型:

按剖面形状分, 可分为等截面(各剖面的形状相等)和变截面(各剖面的形状不相等)叶型。

按叶片扭角分, 可分为扭叶片(叶型各剖面弦线角不相等, 即叶片扭角大于零)和直叶片(叶型各剖面弦线角相等, 即叶片扭角为零)。

归纳起来, 按叶片型面的不同, 叶片分为: 等截面直叶片、等截面扭叶片、变截面直叶片、变截面扭叶片等几种类型。

叶型的粗糙度一般在 $Ra1.6 \sim Ra0.8$ 之间, 个别达 $Ra0.2$ 。

叶型偏差包括形状误差和位置偏差, 叶型的形状偏差是指加工出的实际叶型与理想叶型的偏差, 包括: 叶盆、叶背形状偏差, 进、排气边的形状偏差, 进、排气边位置偏差及由此产生的弦长偏差, 叶盆、叶背形状公差带的标注有如图1-5所示的四种形式。

多数情况下, 设计图标注的叶型公差带不是等宽的, 在叶型靠近前后缘处某一宽度内要窄一些, 而在盆弧和背弧的中间部分给的公差带要宽一些, 这是因为靠近进、排气边处叶型

对气动性能影响大, 提高精度有利于提高发动性能; 叶型中间部分对气动性能影响小, 适当放宽公差带有利于叶片加工制造。

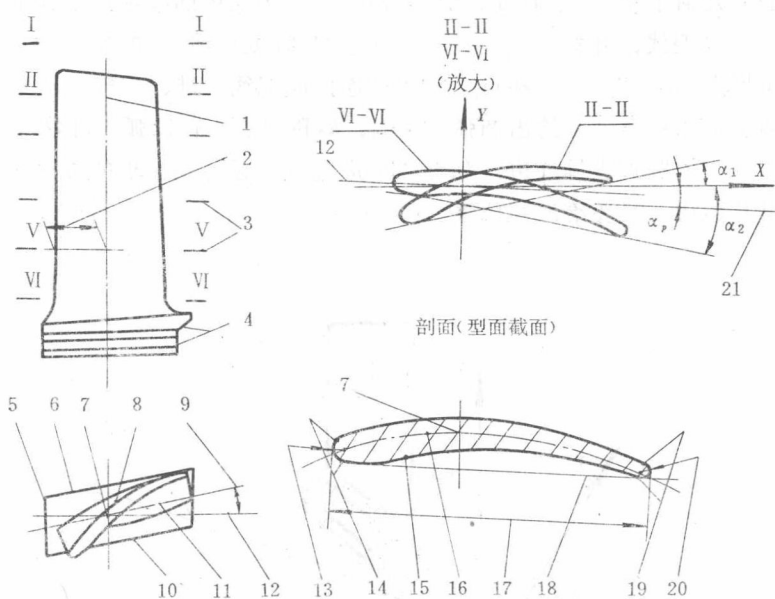


图1-4 叶型与坐标

- 1—积叠轴线; 2—前缘(进气边)位置尺寸; 3—截面; 4—榫头排气边端面;
 5—榫头进气边端面; 6—榫头叶背侧面; 7—积叠点; 8—叶背; 9—安装角;
 10—榫头叶盆侧面; 11—叶盆; 12—发动机轴线; 13—前缘半径 R_0 ; 14—前缘切点;
 15—坐标点; 16—中弧线; 17—弦线长; 18—弦线; 19—后缘切点; 20—后缘半径 R_h ;
 21—平均弦线; α_1 、 α_2 —弦线角; α_p —平均弦线角。

1.2.2 叶片的安装部分——榫头

榫头是叶片安装到发动机上与其他零件联接的部分。

按每个叶片所具有的榫头数量分为单榫头, 双榫头和无榫头(叶型榫头)。

按榫头形状分为缘板T型榫头、缘板轴颈式榫头、齿型榫头、叉型榫头、燕尾型榫头、倒T型榫头、圆柱型榫头等(参见本书第六章表6-1)。

叶片榫头起安装和定位双重作用, 直接关系到叶片的安装精度, 特别是对动叶片, 又是承受载荷的关键部位, 因此, 对榫头的要求严格, 精度高, 粗糙度一般都在 $Ra1.6$ 以下, 是叶片加工中的重要部位。

1.2.3 叶型与榫头的关系

叶片的设计基准是以榫头为基础建立的, 要求叶型保证对基准(也就是对榫头)的位置

关系，以保证叶片安装后叶型位置的正确性，从而保证发动机的性能。

叶型的位置误差包括偏移误差(图1-6)、偏斜误差(图1-7)，扭转误差(图1-8)，这些误差都是由叶型与榫头的相对位置误差引起的。

目前设计的产品，将叶型的位置误差用标注积叠点位置度的形式进行标注，即叶型偏移和偏斜误差的综合结果必须使叶型的位置在标注的数值以内，见图1-8。

叶片加工中，叶型、榫头都经过多次加工，加工基准经过多次变换，但都必须把最终保证叶型形状公差和叶型对榫头的位置公差作为出发点和目标，研究和确定工艺过程和工艺方法。

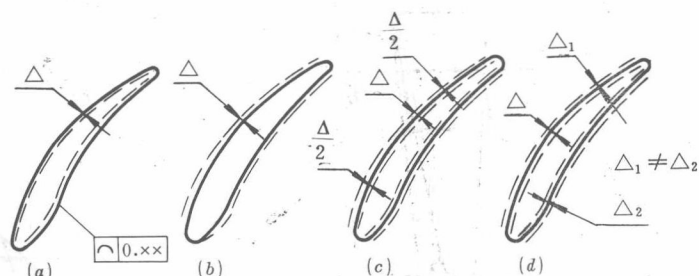


图1-5 叶型公差带标注形式

(a)减薄型；(b)加厚型；(c)对称型；(d)非对称型。

Δ —公差带(法向)； $\Delta/2$ —加厚、减薄对称偏差；

Δ_1 —非对称加厚偏差； Δ_2 —非对称减薄偏差。

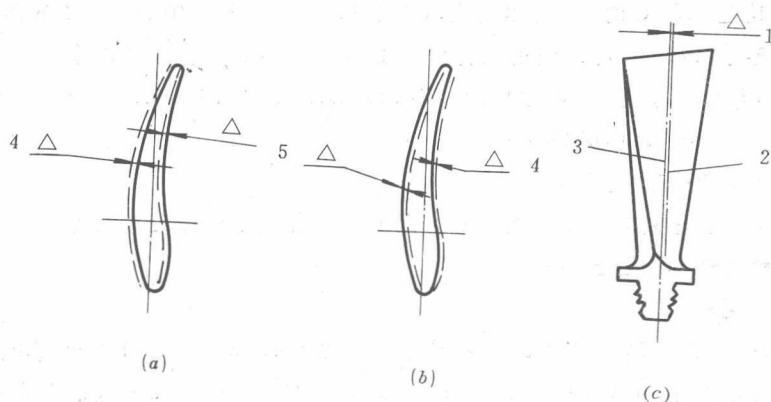


图1-6 叶型的偏移误差

(a) 叶型向叶背方向偏移；(b) 叶型向叶盆方向偏移；(c) 叶片。

1—叶身对榫头偏移量；2—实际叶型积叠轴线；3—叶片理论积叠轴线；

4—加厚；5—减薄； Δ —叶型偏移值。

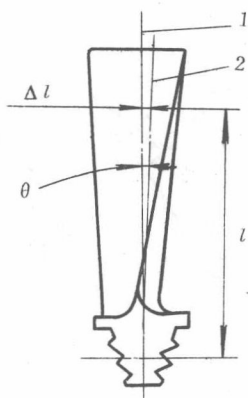


图1-7 叶型偏斜误差

1—理论积叠轴线；2—实际积叠轴线；

Δl —在 l 长度上的偏斜； θ —叶型偏斜误差。

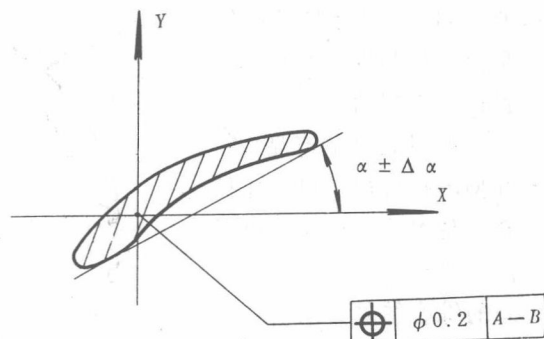


图1-8 叶型扭转误差和位置度

1.2.4 叶片材料

压气机叶片用料：

工作温度不超过240℃时，可以使用LD8、LD7、LD5、LD10、LY2等铝合金。

工作温度不超过300℃，可以使用钛合金，如TA2、TA6、TC4、TC9等。

工作温度在550℃以下时，可以使用30CrMnSiA、40CrNiMoA、Cr17Ni2、1Cr14Ni3W2V8A、1Cr14Ni14W2Mo等。

已使用高温合金制作压气机叶片。

压气机叶片用的合金材料，加工性能相差比较大，铝合金的加工性能最好，而有的钛合金的加工要比不锈钢的加工更困难。

涡轮转子叶片用料：

工作温度在800℃以下时，使用镍基高温合金，如GH4033等；工作温度在850~900℃范围内时，使用镍基合金GH4049等。另外GH2130、GH2135、GH2302等高温合金也常用来制造涡轮转子叶片。这些高温合金都属于锻造高温合金，用锻造的方法制造毛坯。目前DZ3、DZ5、DZ22等铸造合金已用于铸造涡轮转子叶片。

涡轮导向器叶片用料：

涡轮导向器叶片一般都使用铸造高温合金，如K211、K412、K213、K401、K403等，DZ3、DZ5、DZ22等也用于制造涡轮导向器叶片。

涡轮转子叶片和导向器叶片用料，都是耐高温、高强度合金，材料价格高，切削性能差，特别是铸造高温合金更难加工，有的无法用铣削方法加工，只能采用磨削的方法加工。

1.3 航空发动机叶片的制造

航空发动机叶片制造要经过以下过程：

毛坯制造阶段，原材料经过锻造或铸造成型后，经热处理、理化检验、尺寸检验等过程，然后发往机械加工车间进行机械加工。

叶片机械加工阶段，由叶片毛坯，经过机械加工，使叶片达到图纸尺寸。同时配合一些表面处理和特种检验工序，叶片经最终检验后发往装配车间装配。

组合加工阶段，有些叶片的个别部位，在单个叶片加工中不便加工到最终尺寸，或单件加工到最后尺寸后很难保证装配尺寸，要待叶片组装之后进行加工，这类叶片，经组合加工之后叶片制造过程才全部结束。

不需组合加工的叶片，单件叶片加工检验合格之后，叶片制造过程就已完成。

1.3.1 叶片毛坯的制造

叶片毛坯主要有锻造毛坯和铸造毛坯两种，按照毛坯余量分为精密铸造和精密锻造毛坯，普通模锻和普通铸造毛坯。精锻和精铸的叶片毛坯，叶身型面和缘板内侧没有余量，粗糙度已达到最终要求，除精锻毛坯的进、排气边要加工外，叶身型面和缘板内侧面都不需加工，因此，大大减少了机械加工工作量。普通模锻和普通铸造的叶片毛坯，叶型单面余量一般1~1.5mm，有的达2~3.5mm，小的也有0.5mm左右，要靠加工去除型面余量，机械加工的成本较高。尽管精铸、精锻毛坯有明显的优越性，但生产准备周期较长，毛坯制造难度大、成本高，因而在叶片生产批量小、周期紧、一次性生产、材料加工性较好等情况下，往往还要采用普通铸造和普通模锻制造叶片毛坯，甚至采用方料毛坯。

叶片毛坯的材质要求是很严格的，其化学成分、机械性能必须达到设计要求的标准，毛坯进行的热处理，一般是最终热处理，经理化检验要达到规定要求。

锻造叶片一般都规定金属流线方向，锻造工艺必须给予保证，使机械加工叶片时少切断金属纤维，有利于提高叶片强度。

叶身型面余量是沿理想叶型的法线方向分布的，因此毛坯图的型面（即模具体内腔）是在叶片剖面之

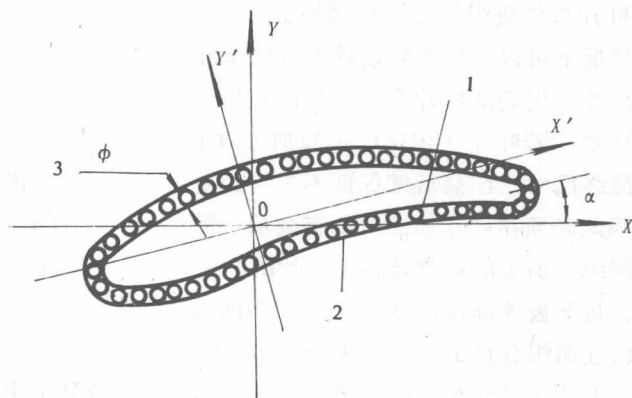


图1-9 毛坯余量

1 - 成品型线；2 - 毛坯型线；3 - 毛坯余量。

外增加余量形成的包络线，见图1-9。

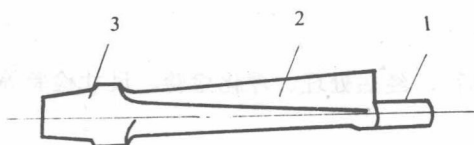


图1-10 毛坯工艺凸台

1—工艺凸台；2—叶身；3—榫头。

1.3.2 叶片的机械加工过程

叶片机械加工过程中，除进行叶片的几何尺寸加工外，还要进行一些其他技术过程，主要包括：加工叶身型面，加工叶片榫头部分，加工安装板部分，加工叶片的其他部位，叶片晶粒检查，叶片无损探伤，叶片测定频率和修正频率，动叶片测定重量和修正重量，叶片强化和光饰处理，叶片表面保护处理等。

1.3.3 叶片的装配组合加工

叶片单件或组件经过机械加工后，大多数情况下可以直接达到设计图纸的全部最终尺寸，但有的叶片个别部位的几何形状或尺寸，若叶片（组件）单独加工时加工到最终尺寸，组装后就保证不了装配要求，因此必须在叶片加工时留有余量。需要装配组合加工的通常是转子叶片的叶尖、叶冠、封严齿等部位，见图1-11。有的设计图已注明组合加工，有的未作注明，叶片加工工艺人员要与装配工艺人员进行协调，确定装配组合加工的部位和余量。

设计毛坯图和设计模具时，要通过计算或作图，求出包络线作为毛坯型线或模腔型线。

设计模具时，确定的分模面往往与 $X-Y$ 坐标不一致，如图1-9所示，这时要将叶型包络线的各坐标点进行坐标转换，换算到 $X'-Y'$ 坐标内。

为了便于建立机械加工基准，机械加工工艺人员必须与毛坯工艺人员共同研究确定毛坯图的基准。包括必要时增加工艺凸台，见图1-10。

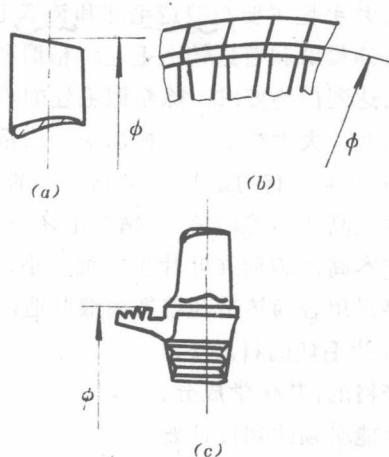


图1-11 装配组合加工

- (a) 叶尖留余量装配组合车；
- (b) 叶冠组合车成圆弧；
- (c) 装配后组合加工封严齿。

1.4 叶片制造工艺的现状和发展趋势

航空发动机日新月异的发展，不断对发动机制造技术提出新课题，促使发动机制造不